

Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações

Uncertainty of the NBR 15575-1 simulation method in assessing the thermal performance of dwellings

Arthur Santos Silva
Marcio José Sorgato
Leonardo Mazzaferro
Ana Paula Melo
Eneir Ghisi

Resumo

Este estudo tem por objetivo investigar a incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) nos resultados dos níveis de classificação de desempenho térmico de habitações. A investigação compreendeu análise do desempenho térmico de uma habitação por simulação computacional no programa EnergyPlus, para o clima de Florianópolis - SC. Foram analisadas variáveis imprescindíveis para a definição de um dia típico, as quais são desconsideradas pelo método de simulação da norma, como data do dia típico de verão e inverno, velocidade e direção do vento, algoritmo de cálculo da irradiação solar e tipo de céu. Tais variáveis foram utilizadas em projeto de experimento estatístico com combinação fatorial para determinar a incerteza nos resultados e a sensibilidade das variáveis no nível de classificação de desempenho. As simulações foram realizadas com nove modelos diferentes de envelope da habitação. Os resultados mostraram que os piores níveis de classificação de desempenho, tanto no verão quanto no inverno, foram os modelos sem contato com o solo. A variável de maior influência para a análise no verão e inverno, para todos os modelos de envelope analisados, foi o tipo de céu. Pode-se concluir que as variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) na criação de um dia típico para simulação exercem considerável influência nos resultados dos níveis de classificação do desempenho térmico, gerando imprecisão nos resultados.

Palavras-chaves: NBR 15575. Simulação computacional. Análise de incerteza. Análise de sensibilidade.

Abstract

This study aims to assess the uncertainty of the NBR 15575-1 (ABNT, 2013) simulation method regarding the results of the thermal performance rating levels of a dwelling. The assessment was performed by analysing the thermal performance of one dwelling using the EnergyPlus computer programme, for the climate of Florianópolis-SC, Brazil. Essential variables, which are not considered in the standard's simulation method, were analysed for the definition of a typical day, such as the date of the typical summer- and typical winter-day, wind speed and direction, solar irradiation calculation algorithm and sky clearness. These variables were used in a statistical experiment with factorial combination to determine the uncertainty of the results and the sensitivity of the variables for rating thermal performance levels. Simulations were carried out for nine different building envelope models. The results showed that the worst performance levels, both in summer and winter, were obtained for those models without ground contact. The most influential variable for summer and winter analyses, in all cases, was sky clearness. Based on these results, the conclusion was made that the variables ignored by NBR 15575-1 have considerable influence on the thermal performance rating levels of buildings, resulting in the lack of accuracy of the final results.

Keywords: NBR 15575. Computer simulation. Uncertainty analysis. Sensitivity analysis.

Arthur Santos Silva
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Marcio José Sorgato
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Leonardo Mazzaferro
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Ana Paula Melo
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Eneir Ghisi
Universidade Federal de Santa
Catarina
Florianópolis - SC - Brasil

Recebido em 26/02/14
Aceito em 15/09/14

Introdução

Durante a década de 80 algumas pesquisas voltadas ao desempenho de edificações começaram a ser desenvolvidas no Brasil, e na década de 90 iniciou-se o desenvolvimento de normas de desempenho. Em 2005, foi publicada a NBR 15220:Desempenho Térmico para Edificações (ABNT, 2005), definindo o zoneamento bioclimático brasileiro e as estratégias bioclimáticas para edificações de interesse social. Para melhorar a qualidade das edificações residenciais brasileiras foi publicada a norma NBR 15575 sob o título de Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008). Após anos de revisões e consultas públicas, essa norma entrou em vigor, em julho de 2013 (ABNT, 2013), estabelecendo requisitos mínimos de desempenho, de vida útil e de garantia para os diversos sistemas que compõem as edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) representa um avanço para o setor da construção civil no Brasil, caracterizando um passo importante para a qualidade das edificações e seu desempenho nas diversas vertentes. A norma estabelece requisitos referentes ao desempenho das edificações, representado por níveis mínimos de desempenho, os quais devem ser obrigatoriamente atendidos. Esta norma é dividida em seis partes: Parte 1 - Requisitos gerais; Parte 2 - Sistemas estruturais; Parte 3 - Sistemas de pisos; Parte 4 - Sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5 - Sistemas de cobertura; e Parte 6 - Sistemas hidrossanitários.

O item 11 da NBR 15575-1 (ABNT, 2013), foco deste estudo, trata especificamente do desempenho térmico das edificações, definindo formas de avaliação para a determinação do nível de classificação através de três procedimentos com requisitos diferentes: simplificado, simulação e medição.

Segundo Brito *et al.* (2012), o método simplificado da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) deve apresentar critérios mais rigorosos, especialmente para a zona bioclimática 8. O estudo comprova que edificações aprovadas pelo método simplificado não apresentaram as características necessárias para obter desempenho térmico mínimo no método detalhado. O trabalho também sugere incluir no método simplificado a consideração da transmitância térmica e da capacidade térmica dos sistemas construtivos, em concomitância.

O método simplificado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) apresenta parâmetros gerais para uma verificação expedida por meio das propriedades

térmicas e físicas dos componentes da edificação, ao contrário do método de simulação, que demanda grande quantidade de dados e é mais dispendioso. O método simplificado impõe limites para as propriedades térmicas do envelope, mas não considera o equilíbrio entre diferentes necessidades para verão e inverno. Resultados de simulações apontam incoerências entre os dois métodos, pois as edificações que apresentaram desempenho satisfatório, segundo o método simplificado, não atenderam aos níveis mínimos de desempenho no método de simulação (MARQUES; CHVATAL, 2013).

Sorgato, Melo e Lamberts (2013) observaram que a avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais através da aplicação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) é diretamente influenciado pela configuração dos dias típicos de verão e de inverno. A determinação do tipo de céu e da data para o dia típico de projeto definem a irradiação solar à qual a edificação está exposta, podendo viabilizar ou não a aprovação de um sistema construtivo.

Soares e Silva (2013) analisaram as prescrições da NBR 15575 em relação às propriedades térmicas da envoltória. O estudo comparou o desempenho de uma edificação unifamiliar através da simulação do dia típico com a simulação anual, para as zonas bioclimáticas 1, 2 e 3. Foram analisadas diferentes propriedades térmicas da envoltória, variando-se a transmitância térmica, de 1,0 W/m²K a 5,0 W/m²K, e a capacidade térmica, de 50 kJ/m²K a 500 kJ/m²K. O estudo concluiu que propriedades térmicas que não são indicadas para essas zonas bioclimáticas atenderam ao desempenho mínimo da norma, quando avaliadas pelo dia típico. Os casos que apresentaram melhor desempenho na simulação anual foram os que possuíam transmitância térmica baixa, mesmo tendo a capacidade térmica abaixo do limite indicado pela norma.

Vale ressaltar que os programas de simulação recomendados para a aplicação do método proposto pela NBR 15575-1 são devidamente validados e utilizados por pesquisadores internacionalmente. No entanto, apesar de os programas calcularem adequadamente variáveis térmicas e energéticas de uma edificação (o que possibilita a determinação de seu desempenho), a confiabilidade dos resultados se refere principalmente à qualidade dos parâmetros de entrada (CORRADO; MECHRI, 2009).

Autores como Hong, Chou e Bong (1999) recomendam a utilização de dados climáticos

simplificados quando não há disponibilidade de dados climáticos necessários para a criação de um arquivo TMY (*Typical Meteorological Year*). Esses autores desenvolveram um método para a geração de um dia típico para fins de dimensionamento de sistema de condicionamento de ar. Constataram que ao menos as variáveis de temperatura de bulbo seco mínimas, médias e máximas, umidade relativa média, temperatura de bulbo úmido média, velocidade média do vento, irradiação solar horizontal média e irradiação solar normal média devem ser definidas corretamente. Akutsu (1998) também desenvolveu um método no qual se deve registrar ao menos a temperatura de bulbo seco, umidade relativa, irradiação solar direta, velocidade e direção do vento. A probabilidade de ocorrência é padronizada e selecionada a partir da temperatura de bulbo seco.

Goulart (1993) relatou alguns métodos existentes para a determinação de dias típicos com base em dados climáticos horários de grande período. Comparou-se o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas com o método de Sattler (1989), constatando grande diferença nos valores obtidos para ambos os dias típicos. Um dia típico obtido por um dos métodos para determinada probabilidade de ocorrência está contido em outro intervalo pelo outro método, com diferente probabilidade de ocorrência. Outros autores, como Siqueira *et al.* (2005), também trataram de desenvolver um método para a definição de dias típicos de projeto para fins de determinação do desempenho térmico de edificações.

Percebe-se que são muitas as variáveis necessárias para a correta definição de um dia típico, seja qual for sua finalidade (dimensionamento de carga térmica, de sistema de ar condicionado, de avaliação de desempenho térmico). Da mesma forma, o próprio método de definição do dia típico a partir de séries de dados climáticos horários contém incertezas e pode apresentar resultados ou comportamentos distintos, os quais só podem ser verificados através de comparação com a própria série temporal climática completa.

Diante dessas observações, este trabalho tem como objetivo investigar a incerteza dos valores das variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) para a configuração dos modelos de simulação (*i.e.*, data do dia típico de projeto, velocidade e direção do vento, algoritmos de cálculo da irradiação solar e tipo de céu) em relação aos resultados do nível de classificação do desempenho de uma edificação residencial.

Método

Foi proposto um experimento de simulação computacional para se analisar a incerteza dos resultados da NBR 15575-1 (2013) para a avaliação do desempenho térmico de habitações com ênfase nos valores das variáveis desconsideradas pelo método de simulação da referida norma.

A condição de controle do experimento foi a definição do modelo-base com algumas configurações fixas. Foram especificadas as variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e como se conduziram as análises de incertezas e sensibilidade.

Utilizou-se o programa de simulação computacional EnergyPlus versão 8.0 (DEPARTMENT..., 2014a) para a realização das análises. Esse programa atende aos requisitos mínimos da NBR 15575-1 em relação à ferramenta de simulação, além de ser um programa utilizado mundialmente para diversas finalidades relacionadas à melhoria do desempenho e da eficiência das edificações em geral.

Modelo-base

Foi adotado um modelo para a análise deste trabalho que representa uma habitação unifamiliar de dois dormitórios, com sala e cozinha conjugadas, e um banheiro, como mostra a Figura 1. A habitação possui 36 m², e sua localização foi considerada na cidade de Florianópolis, SC. Ressalta-se que a cobertura foi modelada como uma zona térmica.

Configurações baseadas na NBR 15575-1

O método de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelece determinadas configurações para o modelo computacional: o mesmo deve ser simulado sem a presença de cargas internas (*e.g.*, ocupação, equipamentos e iluminação) e com uma taxa de infiltração de ar de 1 troca por hora nos ambientes.

Segundo a norma, a simulação computacional deve ser realizada para condições de verão e inverno, definidas por dias típicos de projeto. Para o clima de Florianópolis, a norma apresenta os valores para algumas variáveis necessárias para a criação de um dia típico de projeto, como mostra a Tabela 1. No entanto, outras variáveis necessárias para a criação do dia típico não são definidas pela norma, as quais são analisadas neste trabalho como “variáveis desconsideradas” pela NBR 15575 (ABNT, 2010).

Figura 1- Croqui volumétrico e croqui da planta baixa da habitação unifamiliar

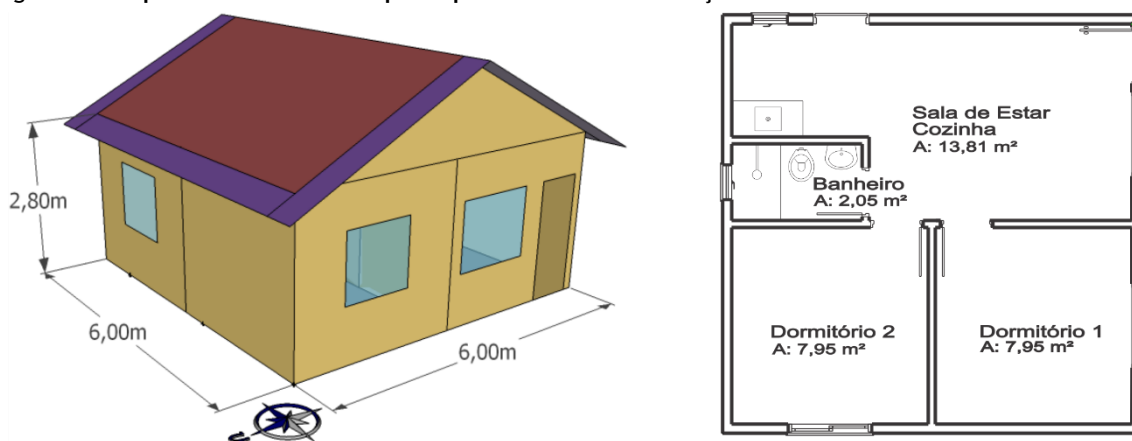


Tabela 1- Variáveis climáticas para a criação dos dias típicos de projeto para a cidade de Florianópolis

Variáveis climáticas	Verão	Inverno
Temperatura extrema diária [°C]	32,7 (máxima)	6,0 (mínima)
Amplitude diária de temperatura [°C]	6,6	7,4
Temperatura de bulbo úmido [°C]	24,4	13,4
Nebulosidade [décimos]	7	6

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

A orientação solar da habitação foi alterada visando identificar o caso extremo considerado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Para as análises com o dia típico de verão, foi adotada a orientação solar na qual os dormitórios são voltados para o norte geográfico, e há aberturas no dormitório 1 e na sala-cozinha voltadas para o oeste. Nas análises de inverno, considerou-se um dos dormitórios voltados para o sul, bem como parte da sala-cozinha, e ambos os dormitórios voltados para o leste.

Variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1

A Tabela 2 mostra as variáveis necessárias para a criação de um dia típico compatível com uma simulação computacional que apresente variáveis climáticas horárias a partir de valores indicativos. O programa EnergyPlus considera todas as variáveis da Tabela 2 para a criação do dia típico, exceto a variável “nebulosidade”. A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) define valores apenas para quatro entre todas as variáveis necessárias.

Ressalta-se que a nomenclatura “dia típico”, utilizada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), pode ter um significado diferente de “dia de projeto”. A palavra “típico” pode ser interpretada como uma condição convencional de determinada probabilidade de ocorrência, enquanto a palavra

“projeto” se refere, geralmente, às condições de dimensionamento, ou seja, condições extremas.

Dessa forma, este trabalho analisou as variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) necessárias para a criação de um dia típico: data do dia típico de verão e inverno; velocidade e direção do vento; algoritmo de cálculo da irradiação solar; e tipo de céu.

Variáveis independentes

A Tabela 3 mostra as variáveis desconsideradas pelo método de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2010) que foram selecionadas para um projeto de experimento fatorial, tornando-se variáveis independentes.

Não foi incluída na análise a variável pressão atmosférica (ver Tabela 2), pois se considerou que possui valores de fácil aquisição, os quais dependem diretamente da localidade analisada. Portanto, não foi considerada como uma incerteza.

Pelo fato de essas variáveis não serem predefinidas pela norma, e também de esta não indicar nenhuma fonte para a determinação de seus valores, aquelas são de livre escolha do usuário do programa de simulação. A incerteza nos resultados da classificação de desempenho térmico decorrente da incerteza dos valores dessas variáveis deve ser levada em consideração.

Tabela 2 - Variáveis envolvidas na criação de um dia típico para simulação computacional, consideradas ou não no programa EnergyPlus e na NBR 15575-1

Variável	Considerada no programa EnergyPlus?	Considerada na NBR 15575-1?
Data (dia e mês)*	Sim	Não
Temperatura de bulbo seco	Sim	Sim
Amplitude de temperatura	Sim	Sim
Temperatura de bulbo úmido	Sim	Sim
Pressão atmosférica	Sim	Não
Velocidade do vento*	Sim	Não
Direção do vento*	Sim	Não
Algoritmo de cálculo da irradiação solar*	Sim	Não
Nebulosidade	Não	Sim
Tipo de céu (<i>Sky Clearness</i>)*	Sim	Não

Nota: as variáveis marcadas com * foram escolhidas para ser analisadas no trabalho por não terem valores definidos pela norma.

Tabela 3- Variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 com os respectivos valores adotados neste trabalho

Variável	Unidade	Níveis
Data do dia típico de verão	-	21/dez; 31/jan; 20/mar
Data do dia típico de inverno	-	21/jun; 31/jul; 20/set
Velocidade do vento	m/s	0,0; 6,7
Direção do vento	graus	0; 90; 180; 270
Algoritmo de cálculo da irradiação solar	-	ASHRAEClearSky; ZhangHuang
Tipo de céu (<i>Sky Clearness</i>)	-	0,00; 0,33; 0,67; 1,00

Este trabalho se limitou a avaliar variáveis relacionadas à criação do dia típico, para que se pudessem realizar as simulações e avaliação de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013). No entanto, há inúmeras outras variáveis relacionadas a uma simulação computacional que não foram analisadas, como variáveis relacionadas à ventilação natural, transferência de calor, configurações computacionais, algoritmos e simplificações de geometria.

As datas dos dias típicos adotadas representam o início e o fim do período de verão (21/dez e 20/mar) e inverno (21/jun e 20/set) no Hemisfério Sul, respectivamente. Os dias 31/jan e 31/jul foram adotados para representar um dia intermediário entre as datas de início e de fim de verão e inverno, respectivamente. Ressalta-se que a data influencia na posição solar e em sua trajetória no respectivo dia típico.

Foram considerados os valores de 0 m/s e de 6,7 m/s para o parâmetro velocidade do vento. Os valores de velocidade do vento dos dias típicos presentes no programa EnergyPlus baseiam-se nos valores indicados pela ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (AMERICAN..., 2013). Esta norma recomenda o valor de dimensionamento de 6,7 m/s.

Sobre o cálculo de irradiação solar, foram analisados o algoritmo ASHRAEClearSky (AMERICAN..., 1997) e o algoritmo de Zhang-Huang (2002). O algoritmo ASHRAEClearSky estima a irradiação solar de cada hora do dia para climas dos Estados Unidos ou climas semelhantes nos Hemisférios Norte e Sul. O algoritmo Zhang-Huang foi desenvolvido inicialmente para climas da China, mas pode ser aplicado a outros climas (DEPARTMENT..., 2014b).

A direção do vento foi analisada para as orientações norte (0°), leste (90°), sul (180°) e oeste (270°).

Neste trabalho, optou-se em considerar quatro valores para a variável “tipo de céu” (0,00; 0,33; 0,67; 1,00). Ressalta-se que a variável “nebulosidade” referenciada na norma não significa necessariamente a definição do tipo de céu, mas somente uma condição geral de registro de nuvens.

Segundo o estudo de Sorgato, Melo e Lamberts (2013), observou-se que o tipo de céu interferiu nos resultados do método de simulação proposto pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013). A escolha de um céu limpo apresentou os mesmos valores de temperaturas internas dos ambientes e do ambiente externo. Entretanto, adotando 30% de céu limpo,

observou-se uma diferença de 4,1 °C entre os ambientes internos e externos.

Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são os resultados obtidos com a aplicação do experimento de simulação computacional, sendo as temperaturas máxima e mínima do ar interno dos ambientes de permanência prolongada da habitação. Elas estão relacionadas ao desempenho térmico da habitação e foram obtidas por simulação no EnergyPlus, conforme as condições estabelecidas no método de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

A Figura 2 mostra as temperaturas mensais do solo consideradas nas análises. As mesmas foram obtidas com a aplicação do programa Slab, vinculado ao EnergyPlus, para um caso com valores médios das variáveis independentes envolvidas no experimento (MAZZAFERRO *et al.*, 2013). Neste caso de valores médios, obteve-se a temperatura média mensal do ar interno para cada ambiente da habitação, para que uma nova simulação fosse realizada para o cálculo correto das temperaturas do solo. Através do pré-processador Slab é possível considerar e observar a influência do solo na temperatura interna da edificação.

O desempenho térmico no verão é determinado pela avaliação da diferença entre a temperatura externa máxima do ar e a temperatura interna máxima do ar, como mostra a Equação 1, em um mesmo dia típico de projeto. Para o inverno, o desempenho é determinado pela diferença entre a

temperatura interna mínima do ar e a temperatura externa mínima do ar, de acordo com a Equação 2, em um mesmo dia típico de projeto.

$$\Delta T - \text{verão} = T_{\text{ext}}(\text{máx}) - T_{\text{int}}(\text{máx}) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\Delta T - \text{inverno} = T_{\text{int}}(\text{mín}) - T_{\text{ext}}(\text{mín}) \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

$T_{\text{ext}}(\text{máx})$ é a temperatura externa máxima do ar do dia típico de verão [°C];

$T_{\text{ext}}(\text{mín})$ é a temperatura externa mínima do ar do dia típico de inverno [°C];

$T_{\text{int}}(\text{máx})$ é a temperatura interna máxima do ar de cada ambiente da habitação no verão [°C];

$T_{\text{int}}(\text{mín})$ é a temperatura interna mínima do ar de cada ambiente da habitação no inverno [°C];

$\Delta T - \text{verão}$ é a diferença de temperatura no verão [°C]; e

$\Delta T - \text{inverno}$ é a diferença de temperatura no inverno [°C].

As variáveis dependentes de diferenças de temperatura ($\Delta T - \text{verão}$ e $\Delta T - \text{inverno}$) são utilizadas para calcular os indicadores de nível de desempenho para verão e inverno. O critério de nível de desempenho final da edificação pode ser classificado em superior, intermediário e mínimo, conforme apresentado na Tabela 4. Observa-se que há também a possibilidade do não atendimento à norma.

Figura 2- Temperatura mensal do solo adotada nas simulações

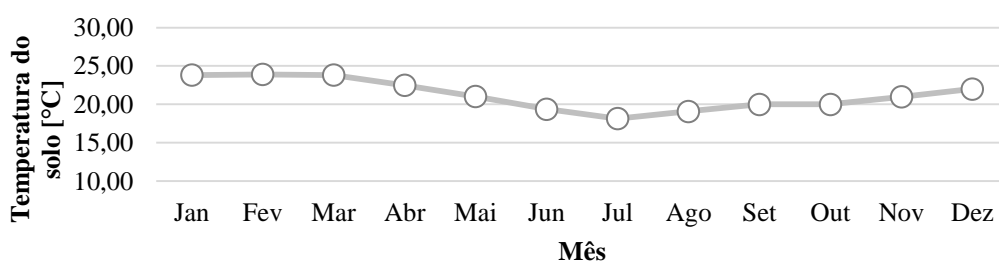


Tabela 4- Critério de classificação do desempenho térmico da edificação em condições de verão e inverno

Classificação	Condição de verão [°C]	Condição de inverno [°C]
Superior	$\Delta T - \text{verão} > 4$	$\Delta T - \text{inverno} > 7$
Intermediário	$4 > \Delta T - \text{verão} > 2$	$7 > \Delta T - \text{inverno} > 5$
Mínimo	$2 > \Delta T - \text{verão} > 0$	$5 > \Delta T - \text{inverno} > 3$
Não atende*	$0 > \Delta T - \text{verão}$	$3 > \Delta T - \text{inverno}$

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Nota: *Não atende: não atende aos requisitos mínimos da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Como interpretação do critério de classificação do desempenho apresentado para o verão, observa-se que, caso a diferença entre a temperatura interna de um ambiente e a temperatura externa seja inferior a 3 °C, obtém-se a classificação intermediária. No inverno, se a temperatura interna for 4 °C superior à temperatura externa, obtém-se a classificação mínima.

Análise de incertezas

As variáveis independentes e seus respectivos valores foram analisados pela técnica estatística de Projeto de Experimento, e combinações fatoriais completas foram consideradas para todas as variáveis (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Sabe-se que as variáveis independentes podem apresentar maior ou menor influência no nível de classificação, dependendo das configurações fixas adotadas pelo experimento. Dessa forma, no intuito de se avaliar a incerteza em diferentes modelos, foram adotadas nove combinações diferentes para a envoltória da habitação. Essas combinações englobaram modificações nas propriedades térmicas das paredes e cobertura, apresentadas na Tabela 5. As combinações fatoriais geraram um total de 192 simulações computacionais para cada modelo.

Nove modelos foram definidos (Tabela 5). Os modelos 1, 2 e 3 apresentam contato com o solo. Os modelos 4 e 5 são iguais ao modelo 1, mas com o piso modelado sob uma condição adiabática e com contato com o ar externo respectivamente. O mesmo se deu para os modelos 6 e 7, iguais ao modelo 2, e para os modelos 8 e 9, iguais ao modelo 3, todos diferindo em relação ao contato do piso.

Os valores de transmitância térmica das paredes variaram de 2,25 W/m²K a 4,40 W/m²K, considerando parede de concreto e de cerâmica

respectivamente. Para as coberturas, os valores de transmitância térmica variaram de 1,31 W/m²K a 2,10 W/m²K, considerando o uso de telhas cerâmicas com e sem forro. Para o forro, adotou-se madeira ou concreto.

Como foram necessárias 192 simulações por modelo, a análise dos nove modelos demandou 1.728 simulações computacionais.

A incerteza foi analisada por meio da verificação das diferenças de temperatura no verão e inverno (ΔT —verão e ΔT —inverno das Equações 1 e 2 respectivamente) para cada um dos ambientes da habitação. Essa verificação permitiu analisar se o nível de classificação de desempenho da edificação realmente é modificado com a variação dos parâmetros subjetivos adotados.

Análise de sensibilidade

Os resultados da análise de incerteza mostram a variabilidade dos resultados das diferenças de temperatura em cada modelo. A análise de sensibilidade deste item permite determinar quais variáveis independentes mais contribuíram para a variabilidade dos resultados. Para isso, aplicou-se a Análise de Variância (ANOVA) em conformidade com o projeto de experimento fatorial realizado.

A Análise de Variância é uma medida de sensibilidade caracterizada pela soma dos quadrados dos resíduos dos resultados. Permite o cômputo de influências da primeira até a *n-ésima* ordem, se 'n' representar o número de variáveis independentes (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Os métodos baseados na decomposição da variância são boas medidas de sensibilidade, pois independem de distribuições de probabilidades dos parâmetros de entrada e possibilitam a obtenção de uma ordem quantitativa de parâmetros mais importantes, bem como interações entre eles (MECHRI; CAPOZZOLI; CORRADO, 2010).

Tabela 5- Propriedades térmicas consideradas em cada modelo computacional

Modelo	Parede			Cobertura			Contato do piso
	U [W/m ² K]	CT [kJ/m ² K]	α [-]	U [W/m ² K]	CT [kJ/m ² K]	α [-]	
1	4,40	230	0,5	1,31	247	0,6	Solo
2	2,33	126	0,5	2,01	26	0,6	Solo
3	2,25	500	0,5	2,10	218	0,6	Solo
4	4,40	230	0,5	1,31	247	0,6	Adiabático
5	4,40	230	0,5	1,31	247	0,6	Pilotis
6	2,33	126	0,5	2,01	26	0,6	Adiabático
7	2,33	126	0,5	2,01	26	0,6	Pilotis
8	2,25	500	0,5	2,10	218	0,6	Adiabático
9	2,25	500	0,5	2,10	218	0,6	Pilotis

Nota: U é a transmitância térmica dos componentes opacos, CT é a capacidade térmica, e α é a absorptância solar das superfícies dos materiais.

Neste trabalho, a influência computada foi limitada às interações de segunda ordem, calculando valor F de cada termo de acordo com a Equação 3. A nomenclatura “termo” se refere a uma variável independente isolada ou a uma interação de segunda ordem entre duas variáveis independentes.

A análise de sensibilidade foi realizada para determinar as variáveis mais influentes em cada um dos modelos computacionais determinados, de acordo com as condições de verão e de inverno da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

$$F(\text{termo}) = MQ(\text{termo})/MQ(\text{erro}) \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

termo é cada variável independente ou interação de segunda ordem;

F é o valor- F de cada termo;

MQ é a média quadrática de cada termo;

erro é o conjunto de termos referentes às interações maiores que 3ª ordem; e

MQ é a média quadrática do erro.

Resultados

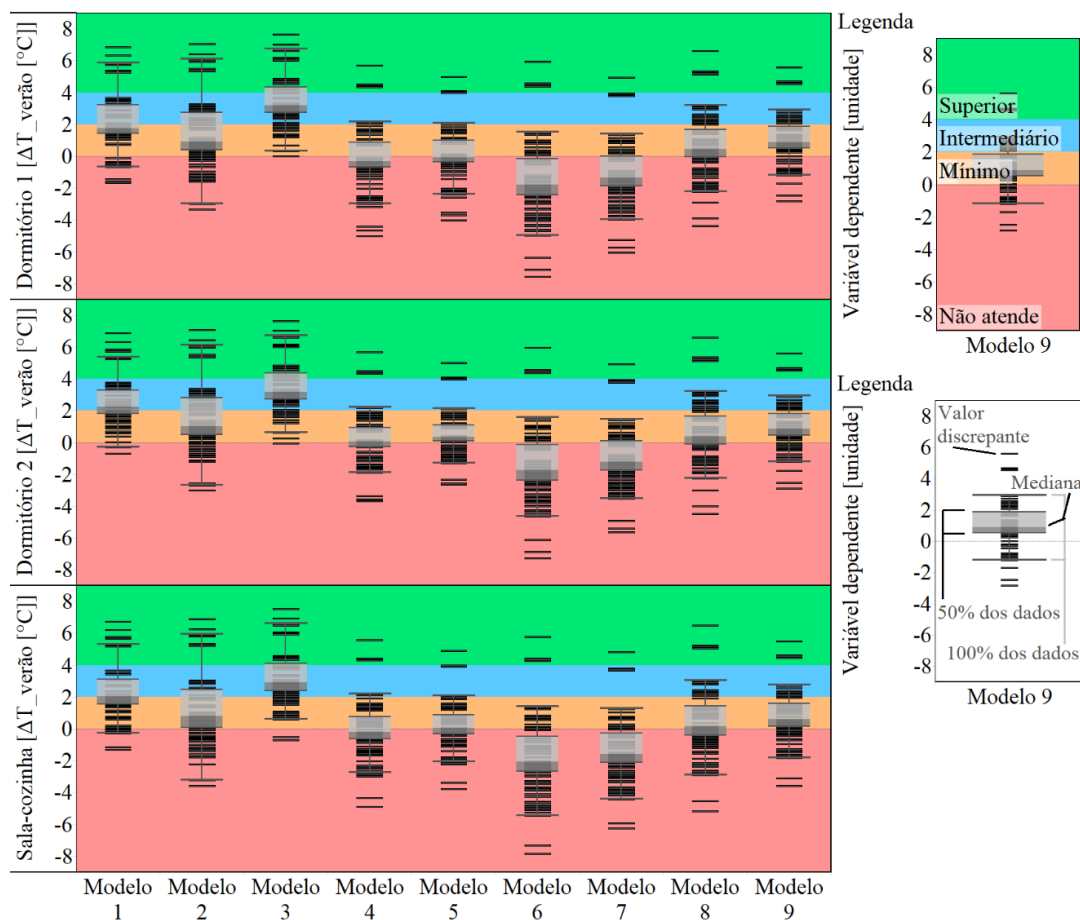
Os resultados são apresentados separadamente por análise de incertezas, análise dos níveis de classificação e análise de sensibilidade.

Análise de incertezas

A Figura 3 apresenta os resultados da variação de temperatura no verão e os níveis de classificação pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) para todos os modelos e para cada ambiente analisado. Também mostra a faixa de classificação dos valores pela NBR 15575-1 para o verão.

A variação de temperatura (ΔT —verão) é consequência das perturbações nos valores das variáveis independentes consideradas na análise. Por exemplo, para o dormitório 1 do modelo 1, o valor de ΔT —verão variou de $-1,6^\circ\text{C}$ a $6,9^\circ\text{C}$. Essa amplitude corresponde a todos os possíveis níveis de classificação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) (“não atende”, mínimo, intermediário e superior).

Figura 3 - Resultados da variação de temperatura no verão para os nove modelos e para cada ambiente da habitação



A amplitude de variação é semelhante entre os modelos de habitação, mas é ligeiramente maior para os modelos 4, 6 e 8 (com piso adiabático), e a menor amplitude foi obtida para o modelo 1. Portanto, nota-se que o contato com o solo se mostrou uma configuração importante no desempenho da edificação e reflete em um comportamento distinto entre os modelos.

De maneira geral, considerando a mediana dos resultados, o modelo 6 apresenta o pior desempenho, e o modelo 3 apresenta o melhor desempenho, com a mediana dos dados dentro do nível intermediário.

Os resultados da variação de temperatura no inverno (ΔT —inverno) são apresentados na Figura 4. Todos os modelos apresentaram amplitudes inferiores aos resultados da avaliação do desempenho de verão.

As maiores incertezas da temperatura foram observadas no modelo 3, que possui alta capacidade térmica das paredes, e no modelo 4, que não troca calor com o solo.

O modelo 8 resultou em casos em todos os níveis de classificação; os demais modelos resultaram em casos em pelo menos três níveis. Nenhum caso do modelo 7 atendeu à norma. Percebe-se que os modelos sem contato com o solo (modelos 4 a 9) foram os que apresentaram os piores desempenhos no inverno.

Análise dos níveis de classificação

As Figuras 5 e 6 mostram o percentual dos casos em cada nível de classificação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) para o desempenho no verão e inverno respectivamente.

Figura 4 - Resultados da variação de temperatura no inverno para os nove modelos e para cada ambiente da habitação

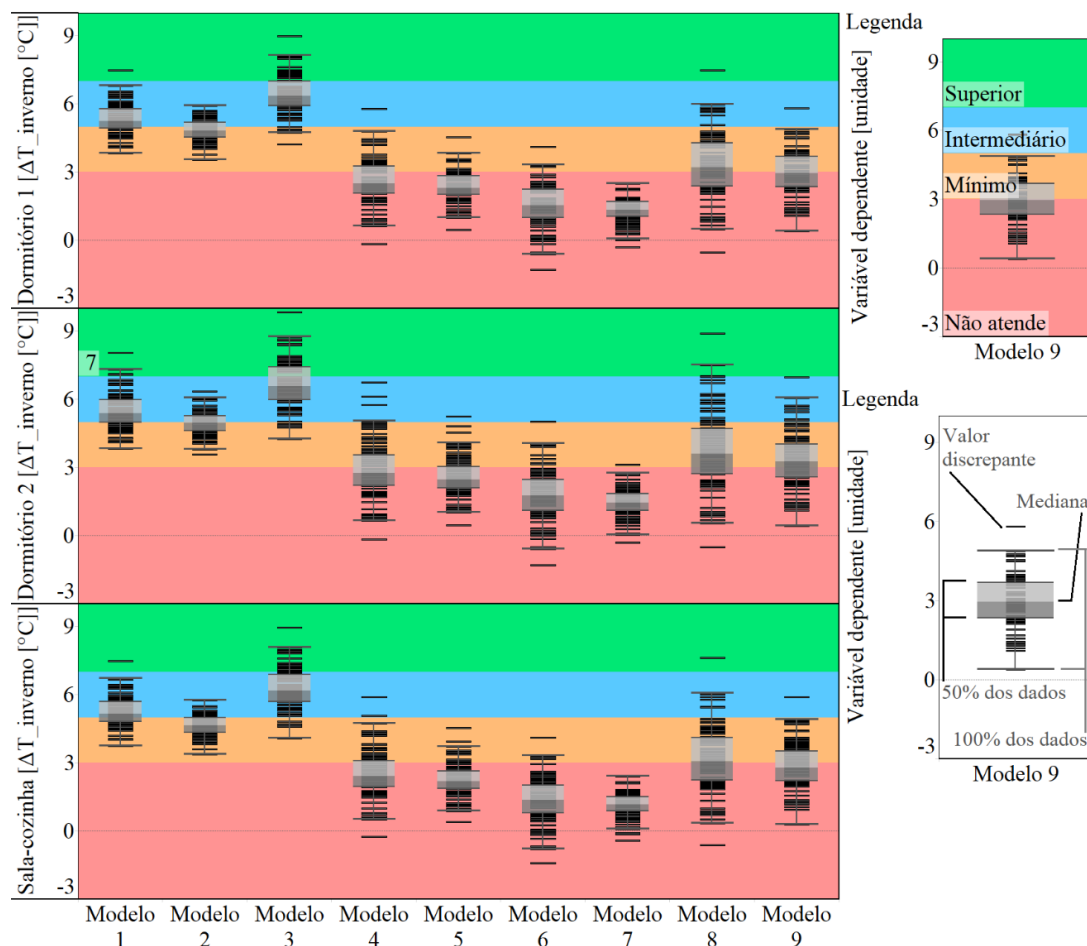


Figura 5 - Percentual dos casos que atingiu cada nível de classificação da NBR 15575-1 para cada ambiente de cada modelo no desempenho para o verão

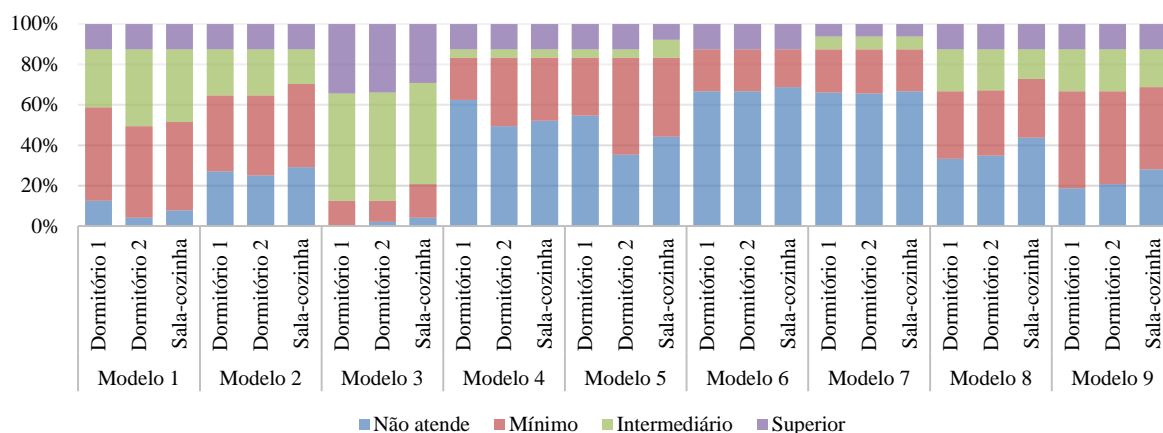
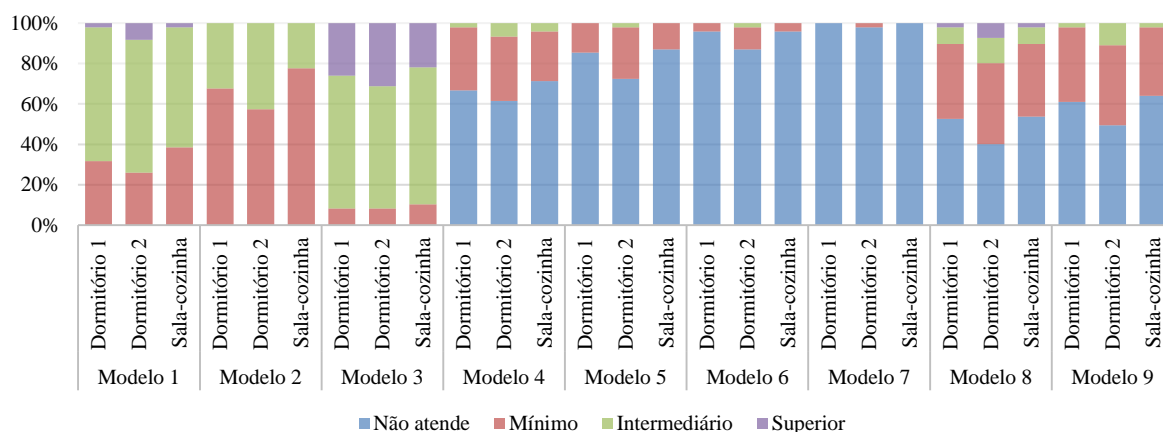


Figura 6 - Percentual dos casos que atingiu cada nível de classificação da NBR 15575-1 para cada ambiente de cada modelo, no desempenho para o inverno



Para o desempenho no verão (Figura 5), observa-se que a propagação das incertezas dos valores das variáveis analisadas causou grande diferença na classificação do desempenho. Para os modelos com contato com o solo (modelos 1 a 3), os níveis de classificação atendem à norma na grande maioria dos casos. No entanto, para os demais modelos (modelos 4 a 9), que não possuem contato com o solo, o maior percentual dos casos resultou em não atendimento à norma.

Todos os modelos apresentaram resultados nos quatro níveis de classificação de acordo com a NBR 15575, exceto o modelo 6, que apresentou resultado descontínuo, não havendo casos no nível intermediário.

Para o desempenho no inverno (Figura 6), uma grande variação dos níveis de classificação também pode ser observada. Todos os casos dos modelos 1 a 3 atendem à NBR 15575 (ABNT, 2010), porém com percentuais distintos em cada

nível (mínimo, intermediário e superior). Os modelos 1 e 3 apresentam a maioria dos casos no nível intermediário de classificação. Os demais modelos (modelo 4 a 9) não atendem à norma em quase sua totalidade, com nenhum caso no nível superior (exceto no modelo 8).

Ressalta-se que, quando uma variável é desconsiderada por um método, espera-se que ela não interfira nos resultados da classificação de desempenho. No entanto, não foi o que se observou neste trabalho, no qual as variáveis com valores subjetivos provocaram grande perturbação nos resultados, ou seja, muita diferença na classificação de desempenho da habitação, tanto no verão quanto no inverno.

Análise de sensibilidade

Através da análise de sensibilidade foi possível observar quais das variáveis desconsideradas pelo método de simulação da NBR 15575-1 (ABNT,

2013) foram as mais influentes no desempenho para o verão e para o inverno (Figura 7). Observa-se que o tipo de céu foi o parâmetro de maior influência para a análise no verão, seguido do efeito de segunda ordem entre o algoritmo de irradiação solar e o tipo de céu, e depois o próprio modelo da habitação (da Tabela 5). No inverno, o modelo da habitação foi a variável mais importante, seguido do tipo de céu.

Esse resultado remete ao fato de que pelo menos o tipo de céu deveria ser uma variável importante a ser considerada pela norma, bem como o algoritmo de cálculo do tipo de céu. Também seria importante a norma apresentar um método padronizado de determinação da curva de temperaturas e irradiação solar diária com base nos valores indicativos para cada localidade.

As Figuras 8 e 9 apresentam os dados dos 1.728 casos de simulação separados por variável mais influente para o verão e inverno respectivamente. O intuito é melhorar a visualização dos efeitos de cada variável para cada ambiente da habitação.

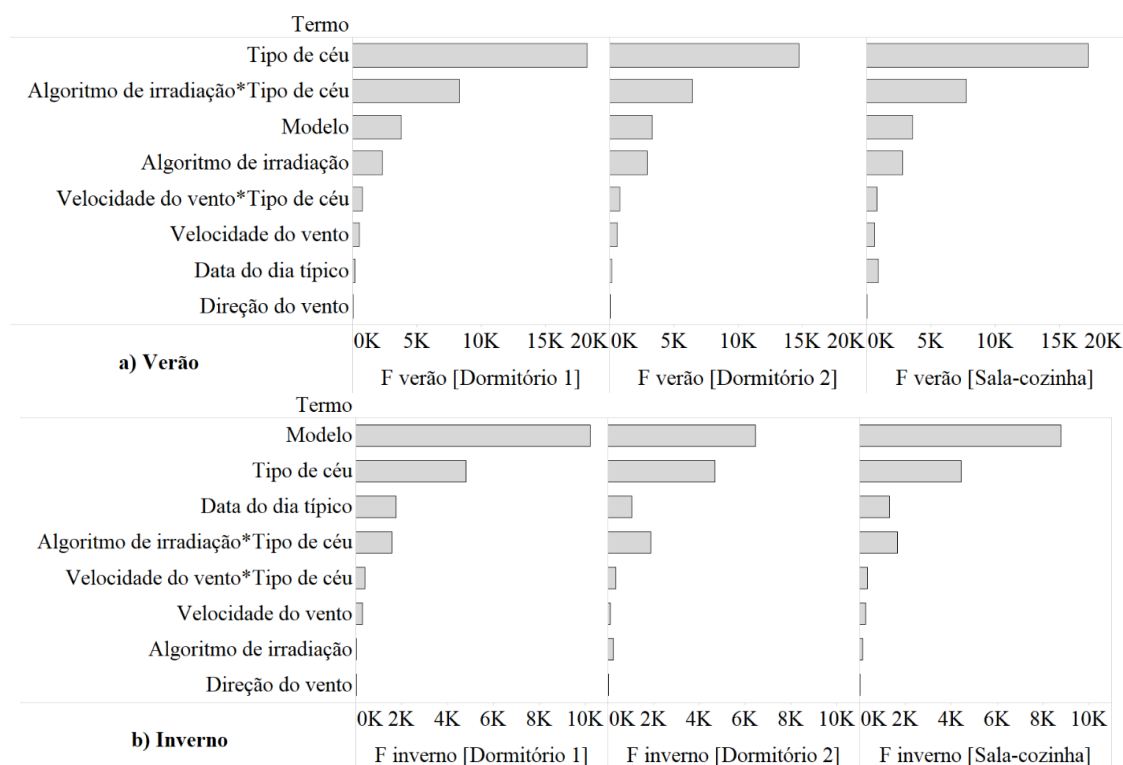
Ao se analisar o dormitório 1 no verão (Figura 8), percebem-se alguns comportamentos interessantes. Ao se aumentar o valor do tipo de céu, a diferença de temperatura vai diminuindo, ou seja, o desempenho vai piorando. Os dados obtidos com o algoritmo ASHRAEClearSky causam altos valores

na diferença de temperatura quando o tipo de céu é 0,00, mas isso é invertido quando o tipo de céu é 1,00; em contrapartida, quando o tipo de céu é 0,67, os valores obtidos com ambos os algoritmos de irradiação solar são semelhantes.

No caso do inverno (Figura 9), como o próprio modelo (o conjunto das propriedades térmicas do envelope) influencia mais do que o tipo de céu, percebe-se que a diferença nos dados decorrentes dos diferentes algoritmos é menor do que no verão. Ao se aumentar o valor do tipo de céu, percebe-se um aumento da diferença de temperatura, ou seja, um aumento do desempenho da habitação. Da mesma forma, os casos com o algoritmo ASHRAEClearSky resultam em valores altos para a diferença de temperatura quando o tipo de céu é 0,00, mas ocorre comportamento contrário quando o tipo de céu é 1,00.

Em resumo, os casos extremos ocorrem sempre para o algoritmo de irradiação ASHRAEClearSky. Os melhores casos para o verão ocorrem para o tipo de céu igual a 0,00 e para o modelo 3. Os piores casos ocorrem para o tipo de céu igual a 1,00 e para o modelo 6. No inverno, os melhores casos ocorrem para o tipo de céu igual a 1,00 e modelo 3; e os piores casos ocorrem para o tipo de céu 0,00 e modelo 6.

Figura 7 - Sensibilidade das variáveis representada pelo valor F para o verão e para o inverno



Nota: *influência conjunta das duas variáveis indicadas.

Figura 8 - Desempenho no verão separado por variáveis mais influentes (tipo de céu, modelo e algoritmo de irradiação)

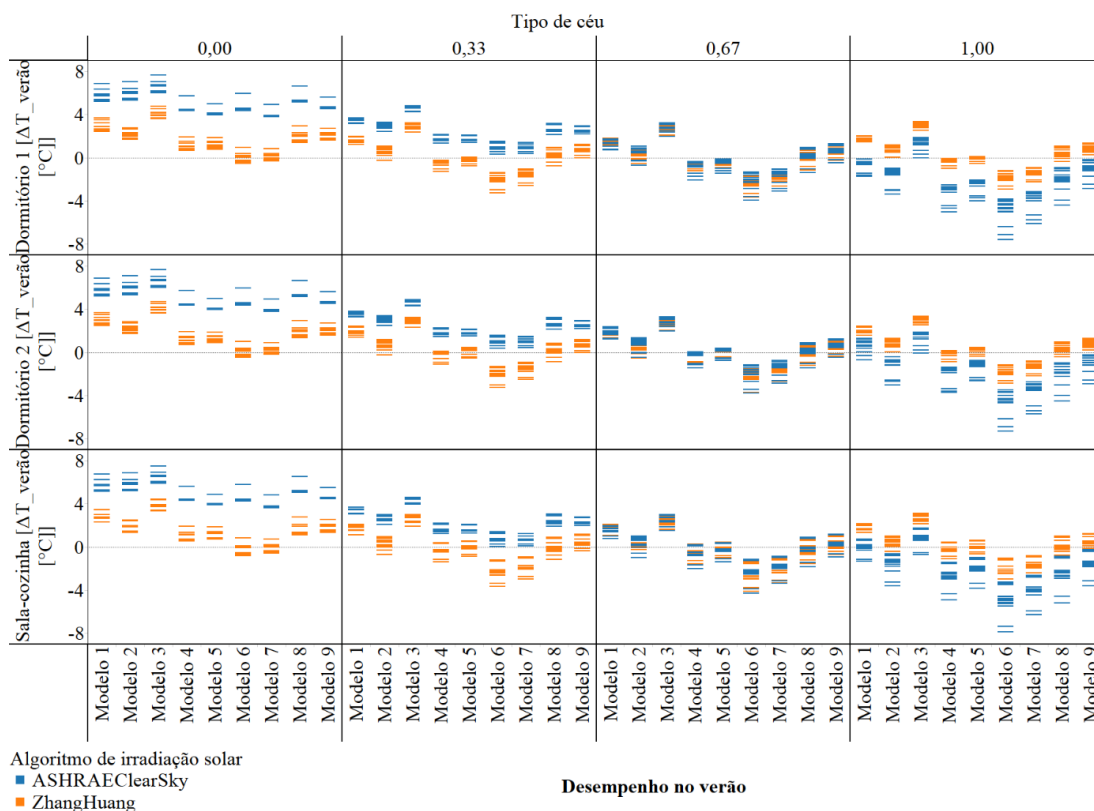
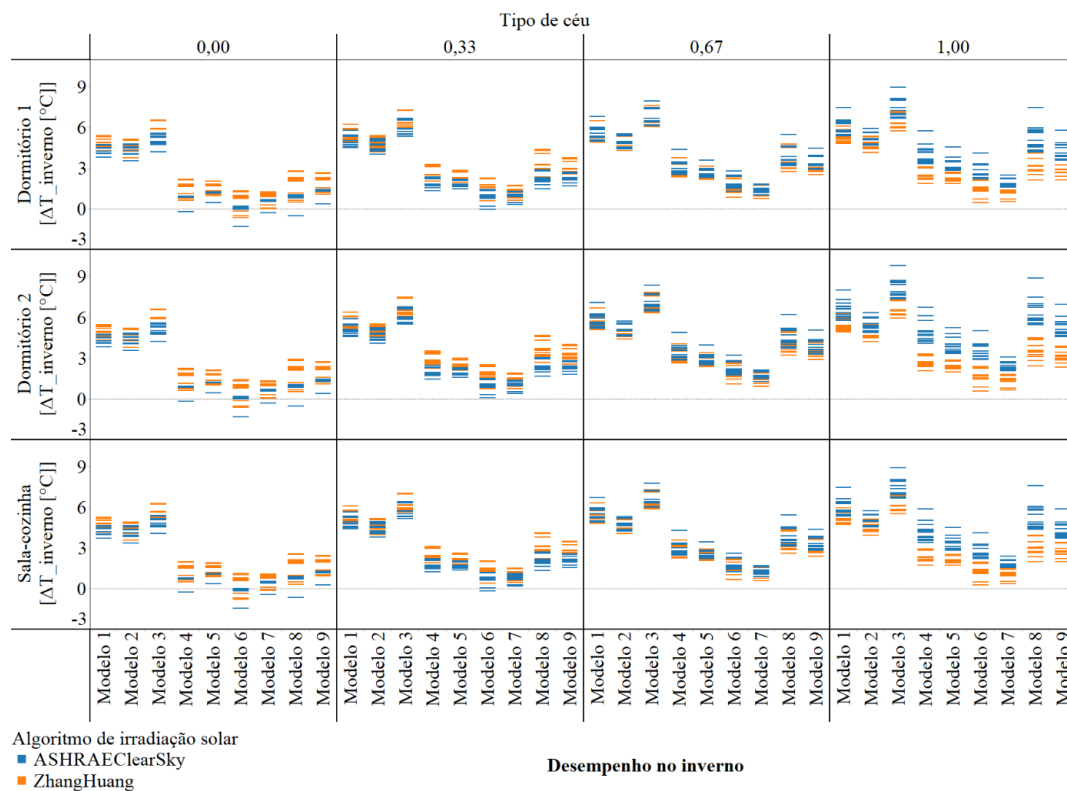


Figura 9 - Desempenho no inverno separado por variáveis mais influentes (tipo de céu, modelo e algoritmo de irradiação)



Conclusões

Este trabalho investigou a incerteza de valores subjetivos adotados para as variáveis desconsideradas pelo método de simulação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013) em relação aos resultados dos níveis de classificação de desempenho térmico para uma habitação.

As variáveis analisadas foram a data do dia típico de verão e inverno, a velocidade e a direção do vento, o algoritmo de cálculo da irradiação solar e o tipo de céu.

A amplitude dos resultados das diferenças de temperatura interna e externa em cada modelo, que representa o indicador de desempenho da norma, foi analisada através da análise de incerteza. As variáveis de valores subjetivos que mais contribuíram para a incerteza dos resultados foram analisadas através da análise de sensibilidade.

Os modelos que apresentaram níveis piores de desempenho, tanto no verão quanto no inverno, foram aqueles cujo piso não tem contato com o solo. Essa variável, que foi diferenciada nos modelos adotados na análise, se mostrou uma configuração importante no resultado de desempenho da habitação.

Constatou-se que o desempenho para verão variou em todos os níveis de classificação da NBR 15575-1 (ABNT, 2013), desde “não atendido” até nível superior. Para a análise do desempenho no inverno, a incerteza dos níveis de classificação foi menor, mas também houve variação nos níveis de classificação. Toda a amplitude causada nos resultados foi decorrente da perturbação dos valores das variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), o que não deveria ocorrer quando uma variável não é considerada por um método.

Observa-se que quando um usuário define aleatoriamente um valor para uma dessas variáveis, essa consideração influencia no nível de classificação obtido através da NBR 15575-1, podendo-se obter valores em todos os níveis.

Os resultados mostraram que, para um modelo de habitação específico, o tipo de céu foi a variável de maior influência no verão e no inverno. O segundo parâmetro subjetivo mais importante observado em quase todos os modelos foi o efeito de segunda ordem entre o algoritmo de cálculo da irradiação solar e o tipo de céu.

Conclui-se que as variáveis desconsideradas pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) exercem considerável influência nos resultados dos níveis de classificação do desempenho térmico, o que causa falta de precisão do resultado final. Diante

disso, os usuários possuem a liberdade de escolher quaisquer valores para essas variáveis para obter melhor classificação do nível de desempenho da edificação, pois o método atual assim o permite.

O trabalho é limitado em relação à análise de dias típicos apenas para a cidade de Florianópolis, SC, e com apenas nove modelos com propriedades térmicas do envelope diferentes para uma mesma tipologia de habitação. No entanto, os resultados se mostraram adequados e válidos, e o objetivo do trabalho foi alcançado satisfatoriamente.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico para edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: desempenho. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edifícios habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook**: fundamentals. Atlanta, GA, 1997.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook**: fundamentals. Atlanta, GA, 2013.
- AKUTSU, M. **Método Para Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações no Brasil**. São Paulo, 1998. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Escola de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BRITO, A. C. *et al.* Contribuições Para o Aprimoramento da NBR 15575 Referente ao Método Simplificado de Avaliação de Desempenho Térmico de Edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., Juiz de Fora, 2012. **Anais...** Juiz de Fora, 2012.
- CORRADO, V.; MECHRI, H. E. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. **Journal of Building Physics**, v. 33, n. 2, p. 125-156, 2009.
- DEPARTMENT OF ENERGY OF U.S. **Programa EnergyPlus**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 26 nov. 2014a.

DEPARTMENT OF ENERGY OF U.S. **EnergyPlus Engineering Reference:** the reference to EnergyPlus calculations. Disponível em: < <http://apps1.eere.energy.gov>>. Acesso em: 26 nov. 2014b.

GOULART, S. V. G. **Dados Climáticos Para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações em Florianópolis.** Florianópolis, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

HONG, T.; CHOU, S. K.; BONG, T. Y. A Design Day For Building Load and Energy Estimation. **Building and Environment**, v. 34, n. 4, p. 469-477, 1999.

MARQUES, T. H. T.; CHVATAL, K. M. S. **A Review of the Brazilian NBR 15575 Standard: Applying the Simulation and Simplified Methods for Evaluating a Social House Thermal Performance.** In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN, San Diego, 2013. **Proceedings...** San Diego, 2013.

MAZZAFERRO, L. *et al.* **Manual de Simulação Computacional de Edifícios Com o Uso do Pré-Processador Slab no Programa EnergyPlus.** Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2013.

MECHRI, H. E.; CAPOZZOLI, A.; CORRADO, V. Use of the ANOVA Approach For Sensitive Building Energy Design. **Applied Energy**, v. 87, n. 10, p. 3073-3083, 2010.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros.** Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2012.

SATTTLER, M. A. **Dias Climáticos Típicos Para o Projeto Térmico de Edificações em Porto Alegre.** Porto Alegre: Cientec, 1989.

SIQUEIRA, T. C. P. A. *et al.* Dados Climáticos Para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 2, p. 133-138, 2005.

SOARES, M. M.; SILVA, A. C. S. B. Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15575 Para as Zonas Bioclimáticas 1, 2 e 3 Para Habitações Térreas de Interesse Social no Método Simplificado. In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 15., Pelotas, 2013. **Anais...** Pelotas, 2013.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Brasília, 2013. **Anais...** Brasília, 2013.

ZHANG, Q. Y.; HUANG, Y. J. Development of Typical Year Weather Files for Chinese Locations. **ASHRAE Transactions**, v. 108, n. 2, p. 1063-1075, 2002.

Agradecimentos

À Capes, ao CNPq, à Eletrobras e à Finep, pela bolsa de estudos dos autores do trabalho.

Arthur Santos Silva

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | Trindade | Florianópolis - SC - Brasil | CEP 88040-900 | Caixa-Postal 476 | Tel.: (48) 3721-5184 | E-mail: arthurssilva07@gmail.com

Marcio José Sorgato

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: sorgatomarcio@yahoo.com.br

Leonardo Mazzaferro

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: leomazzaferro_2970@hotmail.com

Ana Paula Melo

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | E-mail: apaula_melo@hotmail.com

Enedir Ghisi

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações | Universidade Federal de Santa Catarina | Tel.: (48) 3721-2115 | E-mail: enedir@labeee.ufrsc.br

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br